

**19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

Offenlegungsschrift
DE 101 62 380 A 1

Int. Cl.⁷:
H 02 P 6/20

(21) Aktenzeichen: 101 62 380.1
 (22) Anmeldetag: 19. 12. 2001
 (43) Offenlegungstag: 3. 7. 2003

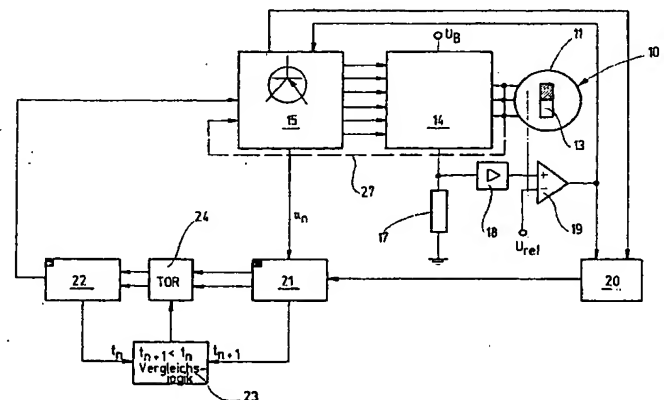
71 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Heidrich, Torsten, 71665 Vaihingen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54) Verfahren zum Starten eines bürstenlosen Gleichstrommotors

Es wird ein Verfahren zum Starten eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit einer mehrphasigen Statorwicklung angegeben, bei dem während des Rotorstillstands eine Mehrzahl von Stromimpulsen auf die Statorwicklung aufgeschaltet, in der Statorwicklung bei jedem Stromimpuls eine Stromanstiegszeit bis zum Erreichen einer Stromschwelle gemessen und aus den gemessenen Stromanstiegszeiten die Rotorposition abgeleitet wird. Für einen geregelten, sensorlosen Hochlauf wird eine genauere Bestimmung der Rotorposition bei geringerem steuerungstechnischen Aufwand dadurch erreicht, daß eine Mehrzahl von Teststromimpulsen nacheinander so auf die Statorwicklung aufgeschaltet werden, daß die Teststromimpulse im Stator über 360° elektrisch um gleiche Winkelschritte versetzte Statorflußvektoren erzeugen. Zu jedem Statorflußvektor wird die Stromanstiegszeit im Summenstrom der Statorwicklung gemessen und die Phasenlage des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als Rotorposition bestimmt.



DE 101 62 380 A 1

DE 101 62 380 A 1

[0001] Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zum Starten eines bürstenlosen Gleichstrommotors nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Bürstenlose Gleichstrommotoren, sog. BLDC-Motoren, werden elektronisch kommutiert, wobei die in Brückenschaltung angeordneten Halbleiterschalter der Schaltvorrichtung nach einem vorgegebenen Kommutierungsmuster zur folgerichtigen Bestromung der einzelnen Wicklungsstränge oder -phasen der Statorwicklung von einer Steuervorrichtung in Abhängigkeit von der Drehstellung des Rotors durchgeschaltet (geschlossen) oder gesperrt (geöffnet) werden. Durch die Kommutierung wird sichergestellt, daß die Winkelbeziehung von 90° elektrisch zwischen einem von der Statorwicklung erzeugten Statorflußvektor und dem Rotordurchflutungsvektor aufrechterhalten bleibt, und somit der Rotor von dem umlaufenden Statorfeld oder Statorflußvektor angetrieben wird.

[0003] Zur Bestimmung der Rotorposition werden z. B. Positionssensoren eingesetzt (DE 40 40 926 C1). Es sind auch BLDC-Motoren bekannt, bei denen zur Bestimmung der Rotorposition rotatorisch induzierte Spannungen ausgewertet werden (DE 37 09 168 A1). Nachteilig dabei ist, daß im Motorstillstand keine Spannung induziert wird, die Rotorlage daher nicht bekannt ist und sich damit der Motoranlauf insbesondere bei stark veränderlichen oder hohen Lasten schwierig gestaltet.

[0004] Aus der US 5 569 990 und/oder US 5 028 852 ist es bekannt, bei einem BLDC-Motor die Rotorposition im Stillstand mit einer Genauigkeit von 180°/m elektrisch zu bestimmen wobei m die Phasenzahl der Statorwicklung ist, um mit dieser Kenntnis der Rotorposition den Motor durch Anlegen eines auf die Rotordrehstellung angepaßten Kommutierungsmusters der Ansteuersignale für die Schaltvorrichtung in die richtige Drehrichtung zu starten. Hierzu werden an die Statorwicklung des stehenden Motors Stromimpulse gelegt, die einerseits lang genug sind, um eine korrekte Messung zu ermöglichen und andererseits kurz genug sind, damit der Rotor nicht dreht, also seine Position beibehält. Hierzu wird an jede Wicklungsphase oder jeden Wicklungsstrang der Statorwicklung ein positiver und ein negativer Teststromimpuls gegeben, die Stromanstiegszeit, d. h. die Zeit, die vergeht, bis der in der Wicklungsphase fließende Strom eine Stromschwelle erreicht, gemessen und die Zeitdifferenz zwischen den beiden Stromanstiegszeiten bestimmt. Der aus den m Stromanstiegszeiten bestehende Zeitvektor wird in eine Bestimmungstabelle für die Statorwicklung eingelesen, welche das zur Kommutierung erforderliche Bestromungsmuster der m Wicklungsphasen enthält, um den Rotor in die gewünschte Drehrichtung umlaufen zu lassen. Die zu dem Zeitvektor zugehörige Kombination der Phasenbestromung wird durch entsprechende Ansteuersignale realisiert, die an die Steuereingänge der Halbleiterschalter der Schaltvorrichtung angelegt werden. Die Ansteuersignale werden dann in der durch das Kommutierungsmuster vorgegebenen Weise variiert, so daß auf den Rotor ein entsprechendes Drehmoment ausgeübt wird und der Rotor höchdreht.

Vorteile der Erfindung

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 hat den Vorteil der genaueren Bestimmung der Rotorposition im Motorstillstand mit geringem steuerungstechnischen Aufwand. Der zur Verfügung

stehende Signalhub wird besser ausgenutzt, so daß die Prüf- oder Testströme in den Wicklungsphasen oder -strängen kleiner bzw. kürzer gemacht werden können, was durch dadurch mögliche größere Bestromungszeiten für die Drehmomenterzeugung ein höheres Antriebsmoment ermöglicht. Ist die Rotorposition bestimmt, so kann gemäß weiteren Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens mit einer geringeren Anzahl von weiteren Teststromimpulsen das mögliche Antriebsmoment sowohl bei aktiver als auch passiver Last weiter gesteigert werden.

[0006] Durch die in den weiteren Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildung und Verbesserungen des im Anspruch 1 angegebenen Verfahrens möglich.

[0007] Ist die Rotorposition bestimmt, so wird nach einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ein Stromimpuls auf die Statorwicklung aufgeschaltet, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch in einer als Krafrichtung gewählten Rotordrehrichtung gegenüber der bestimmten Rotorposition versetzt ist. Nach einer Zeitspanne, die konstant oder abhängig von der Drehzahl des Motors gewählt wird, wird zur Überprüfung der Rotorposition eine geringere Anzahl von weiteren Teststromimpulsen auf die Statorwicklung aufgeschaltet. Ist die Rotorposition unverändert, so wird erneut durch Aufschalten eines Stromimpulses der drehmomentbildende Statorflußvektor erzeugt. Hat sich der Rotor gedreht, so wird mittels eines Stromimpulses ein drehmomentbildender Statorflußvektor generiert, dessen Phasenlage wiederum um 90° elektrisch gegenüber der neu bestimmten Rotorposition versetzt ist. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis eine ausreichende Rotordrehzahl erkannt wird, wonach auf ein anderes bekanntes Verfahren zur sensorlosen Bestimmung der Rotorposition umgeschaltet wird. Damit entfallen die zyklisch auftretenden Teststromimpulse, und der Motor ist in seinem vollen Leistungsumfang nutzbar.

[0008] Die Aufschaltung der weiteren Teststromimpulse kann in verschiedenen Weisen durchgeführt werden. Ist die Drehrichtung des Motors bekannt, so werden gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Teststromimpulse so aufgeschaltet, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage mit der bestimmten Rotorposition übereinstimmt, und ein zweiter weiterer Teststromimpuls einen zweiten Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage um einen elektrischen Winkelschritt in Krafrichtung gegenüber dem ersten Statorflußvektor versetzt ist. Die Krafrichtung ist dabei die bekannte Drehrichtung des Rotors. Die den beiden Statorflußvektoren zugehörigen Stromanstiegszeiten werden gemessen und miteinander verglichen, und die Phasenlage des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit wird als neue Rotorposition bestimmt. Danach wird wiederum ein Stromimpuls auf die Statorwicklung aufgeschaltet, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

[0009] Ist die Drehrichtung des Motors unbekannt, so werden gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor erzeugt, der gegenüber der Phasenlage des zuvor erzeugten drehmomentbildenden Statorflußvektors um 90° elektrisch zuzüglich eines elektrischen Winkelschritts entgegen Krafrichtung versetzt ist, und ein zweiter weiterer und ein dritter weiterer Teststromimpuls jeweils einen zweiten und dritten Statorflußvektor erzeugen, der um jeweils einen elektrischen Winkelschritt in Krafrichtung gegenüber

dem ersten bzw. zweiten Statorflußvektor versetzt ist. Die den Statorflußvektoren zugehörigen Stromanstiegszeiten werden wiederum gemessen und miteinander verglichen, und die Phasenlage des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit wird als neue Rotorposition bestimmt. Anschließend wird ein Stromimpuls auf die Statorwicklung aufgeschaltet, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

[0010] In beiden Fällen hat die vorstehend beschriebene Festlegung der Abfolge des Anlegens der weiteren Teststromimpulse folgende Vorteile: Vor dem Anlegen eines Teststromimpulses ist es notwendig, daß die in den Wicklungsphasen von dem vorhergehenden Teststromimpuls erzeugten Phasenströme abgeklungen sind. Dadurch wird sichergestellt, daß die mit den einzelnen Teststromimpulsen erhaltenen Meßergebnisse nicht durch einen bereits existierenden Phasenstrom verfälscht werden. Nachdem der letzte Teststromimpuls aufgeschaltet worden ist und damit die aktuelle Rotorposition bekannt ist, kann direkt der Stromimpuls zur Erzeugung des drehmomentbildenden Statorflußvektors aufgeschaltet werden. Ein Abklingen der Phasenströme in der Statorwicklung ist in diesem Fall nicht mehr notwendig. Durch die vorstehend beschriebene Festlegung der Abfolge der Teststromimpulse liegt der von dem letzten Teststromimpuls erzeugte Statorflußvektor immer um 30° elektrisch – wenn die Rotorposition bestätigt wurde – und 90° elektrisch – wenn eine neue Rotorposition erkannt worden ist – neben dem Statorflußvektor, der für die anschließende Drehmomenterzeugung zum Weiterbewegen des Rotors erforderlich ist. Liegt der vom letzten Teststromimpuls erzeugte Statorflußvektor nur 30° elektrisch neben dem drehmomentbildenden Statorflußvektor so braucht zur Erzeugung des drehmomentbildenden Statorflußvektors nur eine der durch den letzten Teststromimpuls bestromten Wicklungsphasen der Statorwicklung nicht mehr bestromt zu werden. Ist der Abstand der Statorflußvektoren 90° elektrisch, kann zur Erzeugung des drehmomentbildenden Statorflußvektors immerhin eine der durch den letzten Teststromimpuls bestromten Wicklungsphasen für die Erzeugung des drehmomentbildenden Statorflußvektors gleich bestromt bleiben. Durch diese Integration des letzten Teststromimpulses mit dem Stromimpuls für die Momentenerzeugung wird eine deutliche Drehmomenterhöhung im Hochlauf erzielt, da das Verhältnis der Zeiten für die Teststromimpulse und der Zeiten für die Momentenerzeugung verbessert ist, ohne daß die Zeit für die Momentenerzeugung verlängert wurde.

[0011] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung werden zur Bestimmung des die Rotorposition bestimmenden Statorflußvektors die Phasenlagen und die zugeordneten Stromanstiegszeiten aufeinanderfolgender Statorflußvektoren gespeichert und dabei die Speicherwerte des vorherigen Statorflußvektors mit denen des nachfolgenden Statorflußvektors überschrieben, wenn die dem nachfolgenden Statorflußvektor zugehörige Stromanstiegszeit kleiner ist, als die dem vorherigen Statorflußvektor zugehörige Stromanstiegszeit. Durch diese Verfahrensvariante müssen nicht alle Stromanstiegszeiten und zugeordneten Phasenlagen der Statorflußvektoren abgespeichert werden. Es genügt, wenn jeweils für zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Teststromimpulse, die Stromanstiegszeiten und die Phasenlagen der erzeugten Statorflußvektoren gespeichert werden, so daß sich der Speicherbedarf auf nur zwei Speicher beschränkt. In den ersten Speicher werden dabei immer die jeweils aktuelle Stromanstiegszeit und die aktuelle Phasenlage des gerade erzeugten Statorflußvektors eingeschrieben und eine in der vorstehend beschriebenen Weise arbei-

tende Vergleichslogik sorgt dafür, daß im zweiten Speicher immer die Phasenlage des Statorflußvektors abgespeichert ist, dem die kleinste Stromanstiegszeit zugehörig ist.

Zeichnung

[0012] Die Erfindung ist anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

[0013] Fig. 1 ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zum Betreiben eines bürstenlosen Gleichstrommotors, an einem Gleichspannungsnetz,

[0014] Fig. 2 ein Schaltbild der Schaltungsvorrichtung in der Vorrichtung gemäß Fig. 1,

[0015] Fig. 3 ein in der Steuervorrichtung der Vorrichtung gemäß Fig. 1 abgelegtes Kommutierungsmuster,

[0016] Fig. 4 bis 10 Darstellungen von im Stator erzeugten Statorflußvektoren zur Erläuterung des Verfahrens zum Starten des Gleichstrommotors.

Beschreibung des Ausführungsbeispiels

[0017] In Fig. 1 ist im Blockschaltbild eine Vorrichtung zum Betreiben eines bürstenlosen Gleichstrommotors 10 an einem Gleichspannungsnetz mit der Netzgleichspannung U_B dargestellt. Der Gleichstrommotor 10 weist in bekannter Weise einen Stator 11 mit einer im Ausführungsbeispiel dreiphasigen Statorwicklung 12 (Fig. 2) und einen permanentmagnetenerregten Rotor 13 auf. Alternativ kann der Rotor auch gleichstromerregt sein. Mittels einer Schaltungsvorrichtung 14, die von einer Steuervorrichtung 15 gesteuert wird, werden die drei Wicklungsphasen oder -stränge 121, 122, 123 der dreiphasigen Statorwicklung 12 folgerichtig so bestromt, daß im Stator ein Statorfeld umläuft, das dem Durchflutungsvektor des Rotors 13 um 90° elektrisch in Drehrichtung vorausseilt. Hierzu ist es erforderlich, die Drehstellung des Rotors 13 zu überwachen und die Schaltungsvorrichtung 14 entsprechend anzusteuern. Die momentane Rotordrehstellung wird mit Hilfe der rotatorisch induzierten Spannung in den Wicklungsphasen 121–123 der Statorwicklung 12 bestimmt, was durch die in Fig. 1 strichliniert eingezeichnete Spannungsmeßleitung 27 angedeutet ist.

[0018] Die Schaltungsvorrichtung 14 umfaßt eine Mehrzahl von Halbleiterschaltern, die im Ausführungsbeispiel als MOS-FETs ausgebildet und in einer Zweiweg-Brückenschaltung zusammengefaßt sind. Bei der gewählten Dreiphasenwicklung sind in der Schaltungsvorrichtung 14 sechs Halbleiterschalter T1–T6 vorhanden, deren Steuereingänge an der Steuervorrichtung 15 angeschlossen sind. In der Steuervorrichtung 15 werden entsprechend eines vorgegebenen Kommutierungsmusters Ansteuersignale generiert (in Fig. 3 linker Tabellenteil) die an die einzelnen Halbleiterschalter T1–T6 gelegt werden und dadurch eine Bestromung der Wicklungsphasen 121–123 der Statorwicklung 12 bewirken, wie sie in Fig. 3 im rechten Teil der Tabelle dargestellt ist. Das Pluszeichen bedeutet hierbei eine positive Bestromung in Richtung Pfeil 16 in Fig. 2, ein Minuszeichen eine entgegengerichtete Bestromung. Ein nicht ausgefülltes Kästchen steht für eine stromlose Wicklungsphase. Werden beispielsweise die Halbleiterschalter T1, T4 und T6 angesteuert, so schalten diese durch, und ein Strom fließt in der Wicklungsphase 121 in Richtung Pfeil 16 und in den Wicklungsphasen 122 und 123 gegen Pfeilrichtung.

[0019] Im Motorstillstand besteht das Problem, daß bei Drehzahl Null keine Spannung in der Statorwicklung 12 induziert wird, so daß das sensorlose Verfahren zur Rotorlagebestimmung durch Auswertung der Strang- oder Phasenspannungen des Motors 10 nicht eingesetzt werden kann.

Um einen geregelten Motoranlauf aus dem Stillstand zu gewährleisten, sind weitere Komponenten für einen geregelten sensorlosen Hochlauf vorgesehen. Diese umfassen einen vom Summenstrom der Statorwicklung 12 durchflossenen Meßshunt 17, einen Verstärker 18, einen Komparator 19, an dessen einem Eingang eine Referenzspannung U_{ref} liegt, einen Zeitmesser 20, zwei Speicher 21, 22, eine Vergleichslogik 23 zum Vergleich der Speicherinhalte der beiden Speicher 21, 22 und eine von der Vergleichslogik 23 gesteuerte Torschaltung 24, die bei geöffnetem Tor das Einschreiben der Speicherwerte aus dem Speicher 21 in den Speicher 22 zuläßt.

[0020] Mit diesen Komponenten für den geregelten Hochlauf des Motors 10 wird folgendes Verfahren zum Starten des bürstenlosen Gleichstrommotors 10 durchgeführt:

Im Stillstand des Rotors 13 werden auf die dreiphasige Statorwicklung 12 sechs Teststromimpulse aufgeschaltet, die im Stator Statorflußvektoren erzeugen, die um 60° elektrisch gegeneinander versetzt sind. Hierzu werden die Halbleiterschalter T1–6 der Schaltvorrichtung 14 nacheinander mit den im linken Teil der Tabelle gemäß Fig. 3 angegebenen Schaltsignalen angesteuert. Die Ordnungszahl der Impulse I_n mit $n = 1, 2, \dots, 6$ ist in Fig. 3 in der linken Spalte eingetragen. In dem linken Teil der Tabelle sind die erforderlichen Ansteuersignale der Halbleiterschalter T1–T6 dargestellt. Eine "1" bedeutet dabei einen geschlossenen Halbleiterschalter, also einen durchgeschalteten MOS-FET, eine "0" steht für einen gesperrten MOS-FET, also einen offenen Halbleiterschalter T1–T6. Die Teststromimpulse sind dabei von einer solch kurzen Dauer, daß die im Motor erzeugten Drehmomente so klein sind, daß sich der Rotor 13 aufgrund seines Trägheitsmoments und der Reibung nicht bewegt. Bei jedem Teststromimpuls I_n werden die Wicklungsphasen 121, 122 und 123 der Statorwicklung 12 in der im rechten Teil der Tabelle der Fig. 3 angegebenen Weise bestromt, wobei im Stator ein Statorflußvektor generiert wird, dessen Phasenlage α in der mittleren Spalte der Tabelle in Fig. 3 eingetragen ist. Beim ersten Teststromimpuls I_1 werden z. B. – wie in Fig. 3 ausgewiesen ist – die Halbleiterschalter T1, T4 und T6 angesteuert. In der Wicklungsphase 121 fließt ein zeitlich zunehmender Phasenstrom in Richtung Pfeil 16, der über die Wicklungsphasen 122, 123 entgegen Pfeil 16 und über den Meßshunt 17 fließt. Der über den Meßshunt 17 fließende Summenstrom ergibt eine Meßspannung, die über den Verstärker 18 dem Komparator 19 zugeführt wird. Übersteigt die am Meßshunt 17 abgegriffene und verstärkte Spannung die Referenzspannung U_{ref} wird vom Komparator 19 ein Ausgangssignal generiert, das als Stoppsignal an den Zeitmesser 20 und an die Steuervorrichtung 15 gelangt. Mit Auslösen eines jeden Teststromimpulses durch die Steuervorrichtung 15 wird von der Steuervorrichtung 15 auch der Zeitmesser 20 gestartet, der die Zeit mißt, bis der von dem Teststromimpuls in den Wicklungsphasen 121–123 erzeugte Summenstrom die durch die Referenzspannung U_{ref} festgelegte Stromschwelle erreicht hat. Ist dies der Fall, so wird durch das Ausgangssignal des Komparators 19 die Zeitmessung beendet und über die Steuervorrichtung 15 die Ansteuerung der Halbleiterschalter beendet. Die vom Zeitmesser 20 gemessene Zeit t_1 wird zusammen mit der Phasenlage α_1 des von dem Teststromimpuls I_1 erzeugten Statorflußvektors gespeichert. Der gleiche Vorgang wiederholt sich beim Aufschalten des zweiten Teststromimpuls I_2 durch Ansteuerung der Halbleiterschalter T1, T3 und T6 und beim Aufschalten der übrigen Teststromimpulse I_3 bis I_6 .

[0021] Nach Aufschalten aller Teststromimpulse I_n mit $n = 1-6$ sind nacheinander die in Fig. 4 dargestellten sechs Statorflußvektoren 25 erzeugt worden, und zu jedem Statorflußvektor 25 sind die Stromanstiegszeit t_n und die Phasen-

lage α_n abgespeichert worden. Nunmehr werden die Stromanstiegszeiten miteinander verglichen, und die Phasenlage des Statorflußvektors, dem die kleinste Stromanstiegszeit zugehörig ist, wird als Rotorposition bestimmt. Diese Rotorposition definiert einen Sektor 26 von 60° elektrisch, dessen Symmetrieachse durch die Phasenlage α_n des Stromflußvektors 25 bestimmt ist. In Fig. 4 sind die sechs Stromflußvektoren 25 und die zugehörigen Sektoren 26 dargestellt. Bei einer m-phasigen Statorwicklung mit $m > 2$ werden durch insgesamt $2m$ Teststromimpulse $2m$ Statorflußvektoren 25 erzeugt, die um $180^\circ/m$ elektrisch zueinander versetzt sind und $2m$ Sektoren 26 mit einer Winkelbreite von $180^\circ/m$ elektrisch definieren.

[0022] Um nicht alle Stromanstiegszeiten t_n und die zugeordneten Phasenlagen α_n mit $n = 1-6$ der Statorflußvektoren abspeichern zu müssen und den Speicherbedarf auf die beiden Speicher 21, 22 reduzieren zu können, wird immer die jeweils vom Zeitmesser 20 gemessene aktuelle Zeit t_n in den Speicher 21 geschrieben und dort der Phasenlage α_n des aktuellen Statorflußvektors zugeordnet. Nach dem ersten Teststromimpuls I_1 wird die im ersten Speicher 21 abgelegte Stromanstiegszeit t_1 und die dazugehörige Phasenlage α_1 des vom Testimpuls I_1 erzeugten Statorflußvektors in den zweiten Speicher 22 eingeschrieben. Mit Anlegen des zweiten Teststromimpulses I_2 wird die Stromanstiegszeit t_2 im Summenstrom der Statorwicklung 12 gemessen und diese zusammen mit der zugehörigen Phasenlage α_2 des Statorflußvektors 25 in den Speicher 21 eingeschrieben. Die Vergleichslogik 23 vergleicht nunmehr die im zweiten Speicher 22 enthaltene Stromanstiegszeit t_1 mit der in den ersten Speicher 21 eingeschriebenen Stromanstiegszeit t_2 . Ist die Stromanstiegszeit t_2 kleiner als die Stromanstiegszeit t_1 , steuert die Vergleichslogik 23 die Torschaltung 24 auf, und der Speicherinhalt des zweiten Speichers 22 wird von dem Speicherinhalt des ersten Speichers 21 überschrieben. Ist die Stromanstiegszeit t_2 größer als die Stromanstiegszeit t_1 , so bleibt die Torschaltung 24 geschlossen, und beim nächsten Testimpuls I_3 wird der Speicherinhalt des Speichers 21 mit der Stromanstiegszeit t_3 und der Phasenlage α_3 des von dem dritten Teststromimpuls I_3 erzeugten Statorflußvektors überschrieben. Die Vergleichslogik 23 vergleicht wiederum die in den beiden Speichern 21, 22 abgelegten Stromanstiegszeiten t_{n+1} und t_n und steuert wie vorstehend beschrieben die Torschaltung 24 auf oder nicht. Sind alle sechs Teststromimpulse I_n an die Statorwicklung 12 gelegt worden, so sind im zweiten Speicher 22 die kleinste Stromanstiegszeit und die Phasenlage des zugehörigen Statorflußvektors abgespeichert. Diese Phasenlage bestimmt den Sektor 26, in welchem die maximale Verkettung zwischen Rotorfluß und Statorfluß auftritt, und definiert damit den Sektor 26, in dem sich der Rotor 13 momentan befindet. Angemerkt sei, daß die Zeitspanne zwischen aufeinanderfolgenden Teststromimpulsen so gewählt wird, daß die von einem Teststromimpuls erzeugten Phasenströme in der Statorwicklung 12 vor Aufschalten des nächsten Teststromimpulses abgeklungen sind. Dadurch wird sichergestellt, daß die Stromanstiegszeiten beim Aufschalten der einzelnen Teststromimpulse nicht durch einen bereits existierenden Phasen- oder Strangstrom verfälscht werden.

[0023] Damit der Rotor 13 nach dem Ende der Positionsbestimmung ein Drehmoment abgibt, wird nunmehr ein Stromimpuls auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch in einer als Krafrichtung gewählten Rotordrehrichtung gegenüber der bestimmten Rotorposition versetzt ist. Die Statorflußvektoren 25 für die Drehmomenterzeugung sind in Fig. 5 dargestellt. Ist beispielsweise der Sektor 26 der Rotorposition durch die Pha-

senlage $\alpha = 120^\circ$ des von einem Teststromimpuls hervorgerufenen Statorflußvektors 25 festgelegt (Fig. 6), so besitzt der drehmomentbildende Statorflußvektor 25' die Phasenlage $\alpha = 210^\circ$. Nach Ablauf einer Zeit, die fest oder z. B. in Abhängigkeit von der Drehzahl des Motors gewählt wird, wird durch Aufschalten weiterer Teststromimpulse auf die Statorwicklung 12 die Rotorposition überprüft, d. h. nachgeprüft, ob aufgrund des aufgeschalteten Stromimpulses zur Drehmomentbildung der Rotor 13 seine zuvor bestimmte Position beibehalten oder verändert hat, um das Antriebsmoment beizubehalten.

[0024] Ist die Drehrichtung des Motors bekannt, so werden – wie dies in Fig. 7 und 8 dargestellt ist – die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor 251 erzeugt, dessen Phasenlage α um einen halben elektrischen Winkelschritt, im Ausführungsbeispiel der dreiphasigen Statorwicklung 12 also um 30° elektrisch, gegenüber der Phasenlage $\alpha = 210^\circ$ des drehmomentbildenden Statorflußvektors 25' (Fig. 8) entgegen Kraftrichtung, die mit der Drehrichtung zusammenfällt, versetzt ist. Dabei wird, wie eingangs beschrieben, die Stromanstiegszeit gemessen. Anschließend wird ein zweiter weiterer Teststromimpuls auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, der einen zweiten Statorflußvektor 252 erzeugt, dessen Phasenlage α um einen elektrischen Winkelschritt, im Ausführungsbeispiel also 60° elektrisch, gegenüber dem ersten Statorflußvektor 251 entgegen Kraftrichtung versetzt ist. Auch die diesem Statorflußvektor 252 zugehörige Stromanstiegszeit wird gemessen. Nunmehr werden wiederum die beiden Stromanstiegszeiten miteinander verglichen und die Phasenlage α des Statorflußvektors 251 bzw. 252 mit der kleinsten Stromanstiegszeit als neue Rotorposition bestimmt. Hierzu werden – wie zuvor beschrieben – die Phasenlagen α der von den Teststromimpulsen erzeugten Statorflußvektoren 251, 252 und die zugehörigen Anstiegszeiten t wieder in die Speicher 21, 22 eingeschrieben und durch die Vergleichslogik 23 miteinander verglichen. Die Phasenlage α des Stromflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit wird an die Steuervorrichtung 15 übertragen. Nunmehr wird wie vorstehend beschrieben ein Stromimpuls auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor 25' erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Kraftrichtung versetzt ist (Fig. 8). Der Vorgang der Aufschaltung der beiden weiteren Teststromimpulse und des Stromimpulses zur Drehmomenterzeugung wird solange fortgesetzt, bis die Steuervorrichtung 15 eine ausreichende Rotordrehzahl erkennt. Dann wird von der Ansteuervorrichtung 15 auf die z. B. EMK-basierte sensorlose Rotorpositionsbestimmung umgeschaltet.

[0025] Von einer bekannten Drehrichtung kann ausgegangen werden, wenn das mögliche Lastmoment nicht größer ist als das verfügbare Motormoment, d. h. daß der Motor bei Aufschalten der drehmomentbildenden Stromimpulse sich nicht unbedingt drehen muß, allerdings auch nicht von der Last entgegen der gewünschten Drehrichtung bewegt wird. Ist die Drehrichtung unbekannt, so wird – wie dies in Fig. 9 und 10 dargestellt ist – zusätzlich zu den beiden weiteren Teststromimpulsen noch ein dritter weiterer Teststromimpuls auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, der einen Statorflußvektor erzeugt, dessen Phasenlage α um einen elektrischen Winkelschritt, also im Ausführungsbeispiel um 60° elektrisch, gegenüber dem vom zweiten Teststromimpuls erzeugten Statorflußvektor 252 entgegen Kraftrichtung versetzt ist. Auch hier wird wiederum die Stromanstiegszeit gemessen, und die Phasenlage α des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit bestimmt die neue Rotorposition. Zur nachfolgenden Drehmomenterzeugung wird in

gleicher Weise wiederum ein Stromimpuls an die Statorwicklung 12 gelegt, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor 25' mit einer gegenüber der neu bestimmten Rotorposition um 90° elektrisch in Kraftrichtung vorseilenden Phasenlage erzeugt (Fig. 10).

[0026] Während es vor dem Anlegen eines jeden Teststromimpulses notwendig ist, daß in den Wicklungsphasen 121–123 die Phasenströme vollständig abgeklungen sind, kann der Stromimpuls zur Erzeugung eines drehmomentbildenden Statorflußvektors unmittelbar dem letzten Teststromimpuls folgen. Ein Abklingen der Phasen- oder Strangströme ist in diesem Fall nicht notwendig. Um das Verhältnis von Zeit für die Teststromimpulse und Zeit für den Stromimpuls für die Momenterzeugung zu verbessern, ohne daß die Zeit für die Momenterzeugung verlängert wird, wird bei dem vorstehend beschriebenen Aufschalten der weiteren Teststromimpulse zur Nachprüfung der Rotorposition und zum Steigern des Antriebsmoments für den Rotor 13 in einer modifizierten Weise vorgegangen:

Bei bekannter Drehrichtung des Rotors (Fig. 7 und 8) werden die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor 251a erzeugt, dessen Phasenlage α mit der Rotorposition übereinstimmt, wie sie durch Anlegen der ersten sechs Teststromimpulse bestimmt wurde. Nachfolgend wird ein zweiter weiterer Teststromimpuls auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, der einen zweiten Statorflußvektor 252a erzeugt, dessen Phasenlage um einen elektrischen Winkelschritt, also 60° elektrisch, in Kraftrichtung, die hier wiederum mit der Drehrichtung zusammenfällt, gegenüber dem ersten Statorflußvektor 251a versetzt ist. Die Bezugszeichen für diese beiden Statorflußvektoren sind in Fig. 7 in Klammern gesetzt. Die Stromanstiegszeiten beider Teststromimpulse werden gemessen und die Phasenlage desjenigen Statorflußvektors, dem die kleinste Stromanstiegszeit zugehörig ist, wird als neue Rotorposition bestimmt. Anschließend wird wiederum ein Stromimpuls zur Drehmomenterzeugung auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet. Der von diesem Stromimpuls erzeugte drehmomentbildende Statorflußvektor 25' (Fig. 8) ist um 90° elektrisch gegenüber der neu bestimmten Rotorposition in Kraftrichtung verschoben. Stimmt die neu bestimmte Rotorposition mit der zuvor bestimmten Rotorposition überein, beträgt also im in Fig. 7 und 8 angenommenen Beispiel 120° elektrisch, so liegt der mit dem zuletzt angelegten Teststromimpuls erzeugte Statorflußvektor 252a um einen halben elektrischen Winkelschritt von hier 30° elektrisch neben dem drehmomentbildenden Statorflußvektor 25' so daß zur Generierung des Stromimpulses für den drehmomentbildenden Statorflußvektor mit der Phasenlage $\alpha = 210^\circ$ lediglich die Wicklungsphase 122 nicht mehr bestrahlt zu werden braucht, wie dies aus dem Bestromungsschema im rechten Teil der Tabelle gemäß Fig. 3 hervorgeht. Weicht dagegen die neu bestimmte Rotorposition von der zuvor bestimmten Rotorposition ab, hat also im Beispiel der Fig. 7 die Phasenlage $\alpha = 180^\circ$ elektrisch, so liegt der mit dem zuletzt angelegten Teststromimpuls erzeugte Stromflußvektor 25 90° elektrisch neben dem zur Drehmomentenbildung erforderlichen Statorflußvektor 25' (in Fig. 8 strichliniert eingezeichnet) und zum Anlegen des um 90° in der Phasenlage vorseilenden drehmomentbildenden Statorflußvektors 25' kann eine Wicklungsphase gleich bestromt bleiben. Im in Fig. 7 und 8 vorgestellten Beispiel ist dies bei einer Phasenlage $\alpha = 270^\circ$ des Statorflußvektors 25' die Wicklungsphase 123 der Statorwicklung 12, die durch den letzten Teststromimpuls zusammen mit den Wicklungsphasen 121 und 122 bestrahlt wurde. In beiden Fällen wird damit der letzte Teststromimpuls mit dem Stromimpuls für die Erzeugung des drehmomentbildenden Statorflußvektors in-

tegiert, wodurch eine deutliche Drehmomenterhöhung im Hochlauf erzielt wird.

[0027] Ist wiederum die Drehrichtung des Motors unbekannt, so werden zur Erzielung des gleichen wie vorstehend beschriebenen Vorteils die insgesamt drei weiteren Teststromimpulse so auf die Statorwicklung 12 aufgeschaltet, daß – wie in Fig. 9 dargestellt ist – ein erster weiterer Teststromimpuls 251b einen Statorflußvektor 251b erzeugt, der gegenüber der Phasenlage des drehmomentbildenden Statorflußvektors 25' um 90° elektrisch zuzüglich eines halben elektrischen Winkelschritts, also 30° elektrisch, entgegen Krafrichtung versetzt ist. Die zugehörige Stromanstiegszeit wird gemessen und gespeichert. Im angenommenen Beispiel der Fig. 9 und 10 hat dieser Statorflußvektor 251b eine Phasenlage von $\alpha = 60^\circ$, ist also gegenüber dem drehmomentbildenden Statorflußvektor 25' um 150° elektrisch entgegen Krafrichtung versetzt. Danach wird ein zweiter weiterer Teststromimpuls aufgeschaltet, der einen Statorflußvektor 252b generiert, der gegenüber dem ersten Statorflußvektor 251b um einen elektrischen Winkelschritt, also 60° elektrisch, in Krafrichtung versetzt ist. Auch hier wird die zugehörige Stromanstiegszeit gemessen. Ein dritter weiterer Teststromimpuls wird aufgeschaltet, der einen dritten Statorflußvektor 253b generiert, dessen Phasenlage wiederum um einen elektrischen Winkelschritt, also um 60° elektrisch, gegenüber dem zweiten Statorflußvektor 252b versetzt ist. Die zugehörige Stromanstiegszeit wird wiederum gemessen. Nunmehr wird derjenige der drei Statorflußvektoren 251b, 252b und 253b bestimmt, dessen Stromanstiegszeit die kleinste ist. Die Phasenlage α dieses Statorflußvektors definiert die neue Rotorposition. Auch hier liegt der Statorflußvektor 213b, der von dem zuletzt auf die Statorwicklung 12 aufgeschalteten Teststromimpuls erzeugt wurde, um 30° elektrisch neben dem zur Drehmomentenbildung erforderlichen Statorflußvektor 25', wenn die gleiche Rotorposition wie zuvor erkannt wird, und um 90° elektrisch neben dem Statorflußvektor 25', der für die anschließende Drehmomenterzeugung benötigt wird, wenn sich die Rotorposition verändert hat. Wie vorstehend schon hervorgehoben wurde, braucht im ersten Fall (gleiche Rotorposition) für die Drehmomenterzeugung nur eine Phase nicht mehr bestromt zu werden. Im zweiten Falle der veränderten Rotorposition ist ein Stromflußvektor zu generieren, der um 90° elektrisch der neu bestimmten Rotorposition in Krafrichtung vorausseilt. Wie das Bestromungsmuster der Wicklungsphasen in dem rechten Tabellenteil der Fig. 3 zeigt, kann hierzu eine gleiche Wicklungsphase bestromt bleiben, die auch durch den zuletzt aufgeschalteten Teststromimpuls bestromt wurde. Der Vergleich der Stromanstiegszeiten der drei Teststromimpulse erfolgt auch hier wiederum durch die Vergleichslogik 23, und die Phasenlage α des zuletzt in den zweiten Speicher 22 eingeschriebenen Statorflußvektors, die den Sektor 26 bestimmt, in welchem sich der Rotor 13 befindet, wird der Steuervorrichtung 15 zugeführt. Auch hier werden die drei Teststromimpulse und der Stromimpuls zur Drehmomenterzeugung nach Ablauf einer bestimmten Zeit wiederholt angelegt und die gleiche Prozedur solange durchgeführt, bis die Steuervorrichtung 15 eine ausreichende Drehzahl des Rotors 13 erkennt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Starten eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit einem permanentmagnet- oder gleichstromerregten Rotor (13) und einem eine mehrphasige Statorwicklung (12) tragenden Stator (11), sowie mit einer von einer Steuervorrichtung (15) gesteuerten Schaltvorrichtung (14) zum folgerichtigen Anschlie-

ßen der Wicklungsphasen (121, 122, 123) der Statorwicklung (12) an eine Netzgleichspannung, bei dem während des Rotorstillstands durch entsprechende Ansteuerung der Schaltvorrichtung (14) eine Mehrzahl von Stromimpulsen auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet, in der Statorwicklung (12) bei jedem Stromimpuls die Stromanstiegszeit bis zum Erreichen einer Stromschwelle gemessen und aus den gemessenen Stromanstiegszeiten die Rotorposition abgeleitet wird, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mehrzahl von Teststromimpulsen nacheinander so auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, daß die Teststromimpulse über 360° elektrisch um gleiche Winkelschritte versetzte Statorflußvektoren (25) erzeugen, und daß zu jedem Statorflußvektor (25) die Stromanstiegszeit im Summenstrom der Statorwicklung (12) gemessen und die Phasenlage (α) des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als Rotorposition bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeitspanne zwischen aufeinanderfolgenden Teststromimpulsen so gewählt wird, daß die von einem Teststromimpuls erzeugten Phasenströme in der Statorwicklung (12) vor Aufschalten des nächsten Teststromimpulses abgeklungen sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Winkelschritte bei einer m-phasigen Statorwicklung (12) zu $180^\circ/m$ elektrisch gewählt und insgesamt 2m Teststromimpulse auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet werden, wobei m größer 2 ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, daß nach Bestimmen der Rotorposition ein Stromimpuls auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor (25') erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch in einer als Krafrichtung gewählten Rotordrehrichtung gegenüber der bestimmten Rotorposition versetzt ist, und daß nach einer Zeitspanne weitere Teststromimpulse zur Überprüfung der Rotorposition auf und weitere Stromimpulse zur Drehmomenterzeugung die Statorwicklung (12) aufgeschaltet werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet werden, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor (251) erzeugt, dessen Phasenlage (α) um einen halben elektrischen Winkelschritt gegenüber der Phasenlage (α) des drehmomentbildenden Statorflußvektors (25') entgegen Krafrichtung versetzt ist, und ein zweiter weiterer Teststromimpuls einen Statorflußvektor (252) erzeugt, dessen Phasenlage um einen elektrischen Winkelschritt gegenüber dem ersten Statorflußvektor (251) entgegengesetzte Krafrichtung versetzt ist, daß die den beiden Statorflußvektoren (251, 252) zugehörigen Stromanstiegszeiten gemessen und miteinander verglichen werden und die Phasenlage (α) des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als neue Rotorposition bestimmt wird und daß ein weiterer Stromimpuls auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor (25') erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet werden, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor (251) erzeugt, dessen Phasenlage (α) gegenüber der Phasenlage (α) des drehmomentbildenden Statorflußvektors (25') um einen halben

elektrischen Winkelschritt entgegen Krafrichtung versetzt ist und ein zweiter und dritter weiterer Teststromimpuls eine zweiten und dritten Statorflußvektor (252, 253) erzeugen, deren Phasenlagen (α) gegenüber dem ersten Statorflußvektor (251) bzw. dem zweiten Statorflußvektor (252) um jeweils einen elektrischen Winkelschritt entgegen Krafrichtung versetzt sind, daß die den Statorflußvektoren (251, 252, 253) zugehörigen Stromanstiegszeiten gemessen und miteinander verglichen werden und die Phasenlage (α) des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als neue Rotorposition bestimmt wird und daß ein weiterer Stromimpuls auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor (25') erzeugt, dessen Phasenlage (α) um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

7. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet werden, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor (251a) erzeugt, dessen Phasenlage (α) mit der bestimmten Rotorposition übereinstimmt und ein zweiter weiterer Teststromimpuls einen zweiten Statorflußvektor (252a) erzeugt, dessen Phasenlage um einen elektrischen Winkelschritt in Krafrichtung gegenüber dem ersten Statorflußvektor (251a) versetzt ist, daß die den beiden Statorflußvektoren (251a, 252a) zugehörigen Stromanstiegszeiten gemessen und miteinander verglichen werden und die Phasenlage (α) des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als neue Rotorposition bestimmt wird und daß ein weiterer Stromimpuls auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor (25') erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

8. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die weiteren Teststromimpulse so aufgeschaltet werden, daß ein erster weiterer Teststromimpuls einen ersten Statorflußvektor (251b) erzeugt, der gegenüber der Phasenlage des drehmomentbildenden Statorflußvektors (25') um 90° elektrisch zuzüglich eines elektrischen Winkelschritts entgegen Krafrichtung versetzt ist, ein zweiter weiterer und dritter weiterer Teststromimpuls einen zweiten und dritten Statorflußvektor (252b, 253b) erzeugen, der um jeweils einen elektrischen Winkelschritt in Krafrichtung gegenüber dem ersten bzw. zweiten Statorflußvektor (251b, 252b) versetzt ist, daß die den Statorflußvektoren (251b, 252b, 253b) zugehörigen Stromanstiegszeiten gemessen und miteinander verglichen werden und die Phasenlage (α) des Statorflußvektors mit der kleinsten Stromanstiegszeit als neue Rotorposition bestimmt wird und daß ein weiterer Stromimpuls auf die Statorwicklung (12) aufgeschaltet wird, der einen drehmomentbildenden Statorflußvektor (25') erzeugt, dessen Phasenlage um 90° elektrisch gegenüber der neuen Rotorposition in Krafrichtung versetzt ist.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5–8, dadurch gekennzeichnet, daß die Aufschaltung der weiteren Teststromimpulse und des weiteren drehmomentbildenden Stromimpulses solange wiederholt wird, bis eine ausreichend große Rotordrehzahl erreicht ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung des die Rotorposition bestimmenden Statorflußvektors die Phasenlagen (α_n) und die zugeordneten Stromanstiegszeiten (t_n) aufeinanderfolgender Statorflußvektoren gespeichert

werden und dabei die Speicherwerte des vorherigen Statorflußvektors mit denen des nachfolgenden Statorflußvektors überschrieben werden, wenn die dem nachfolgenden Statorflußvektor zugehörige Stromanstiegszeit kleiner ist, als die dem vorherigen Statorflußvektor zugehörige Stromanstiegszeit.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

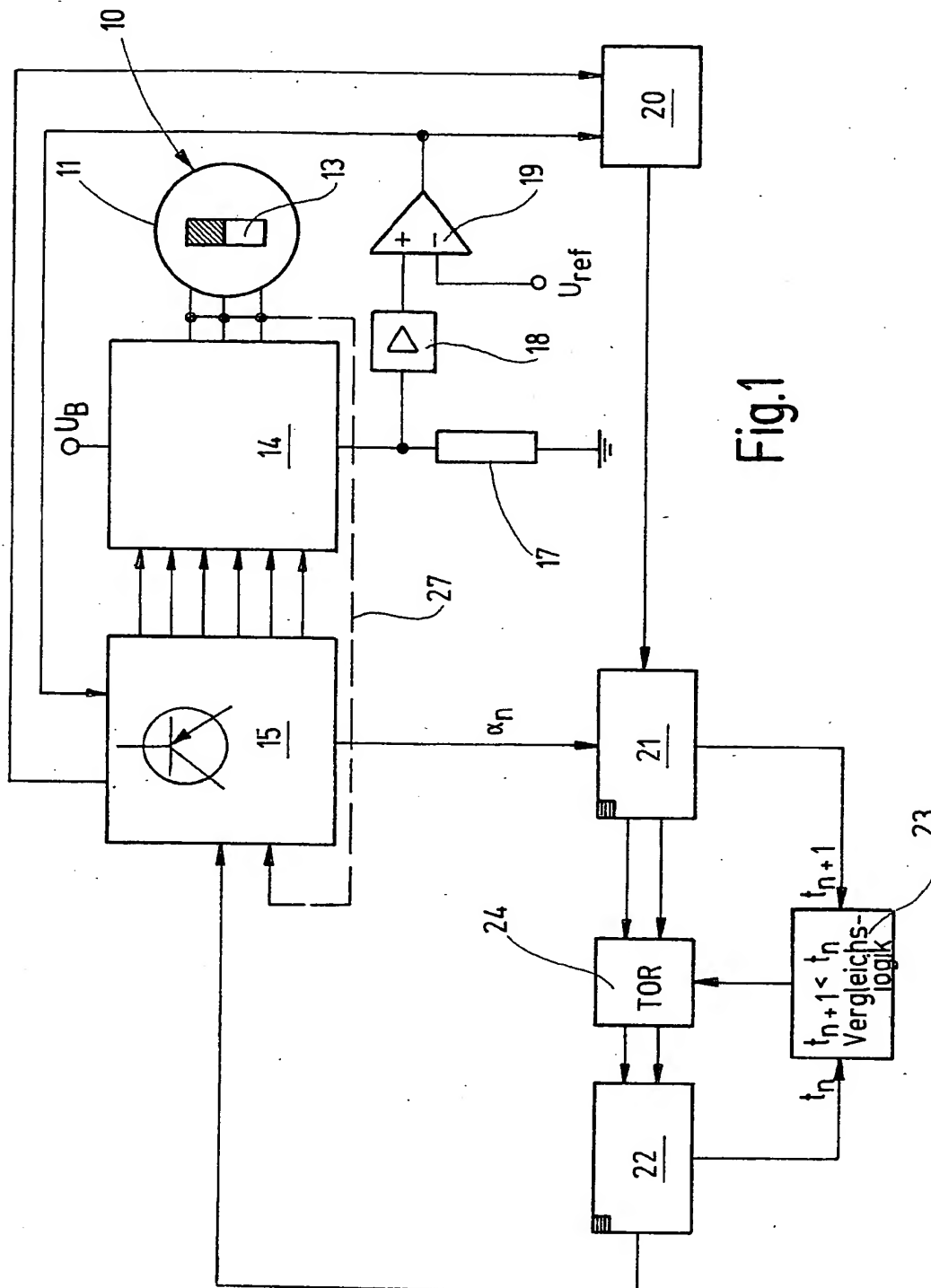
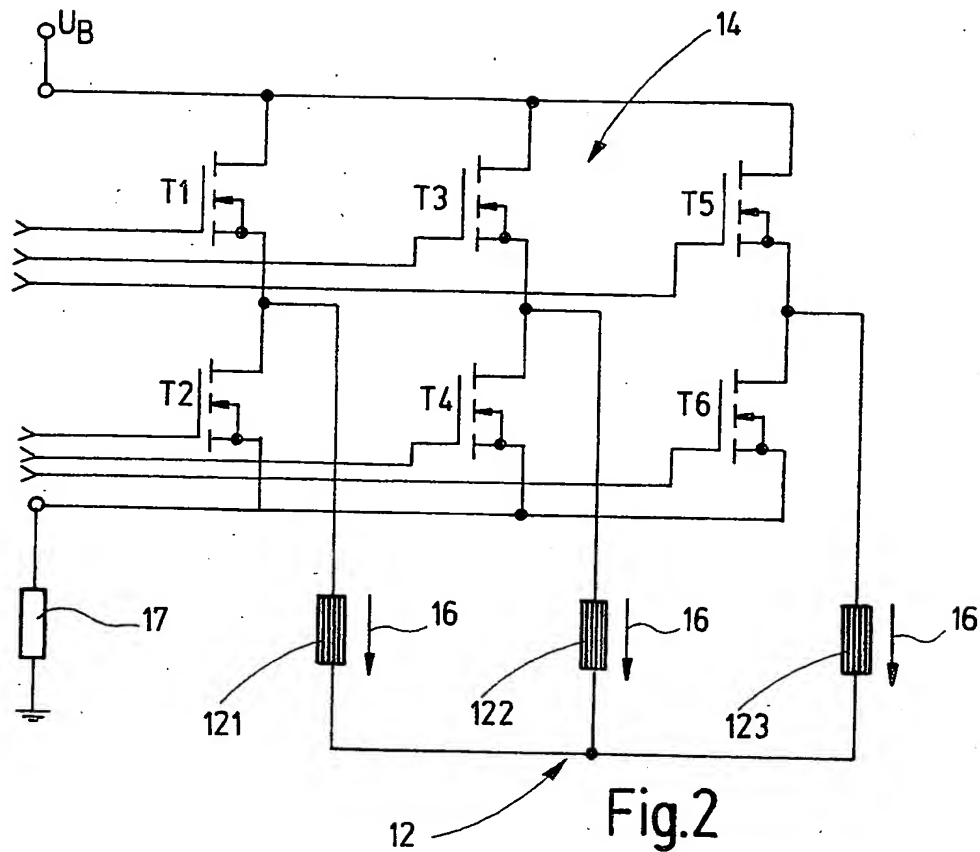


Fig. 1



I_n	Brückenschaltung						Phasenlage α_n SFV	Wicklungsphase		
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		121	122	123
1	1	0	0	1	0	1	0°	+	-	-
	1	0	0	0	0	1	30°	+	-	-
2	1	0	1	0	0	1	60°	+	+	-
	0	0	1	0	0	1	90°		+	-
3	0	1	1	0	0	1	120°	-	+	-
	0	1	1	0	0	0	150°	-	+	
4	0	1	1	0	1	0	180°	-	+	+
	0	1	0	0	1	0	210°	-		+
5	0	1	0	1	1	0	240°	-	-	+
	0	0	0	1	1	0	270°		-	+
6	1	0	0	1	1	0	300°	+	-	+
	1	0	0	1	0	0	330°	+	-	

Fig. 3

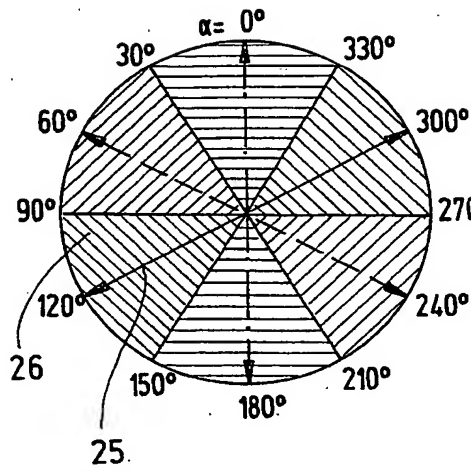


Fig. 4

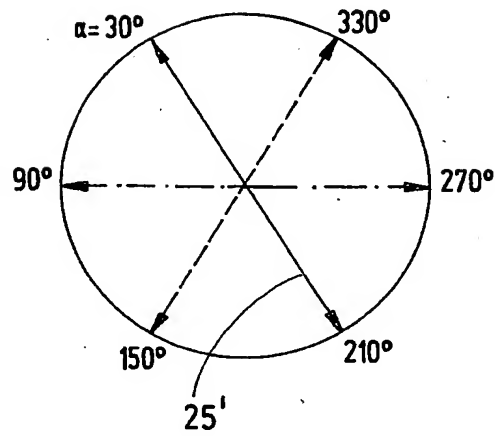


Fig. 5

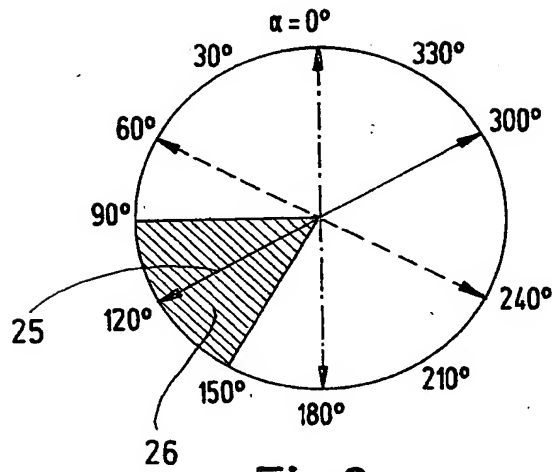


Fig. 6

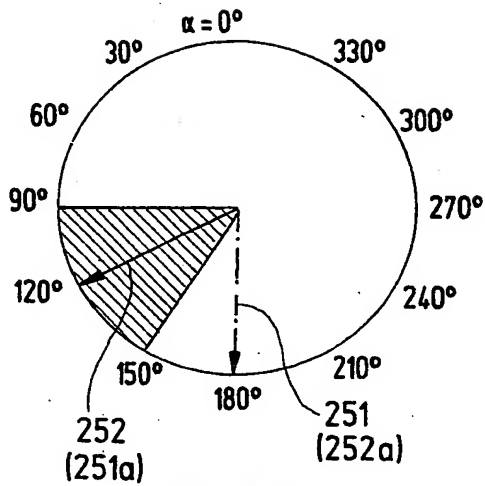


Fig.7

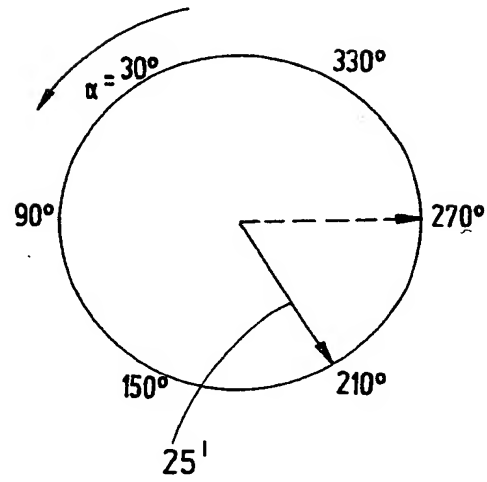


Fig.8

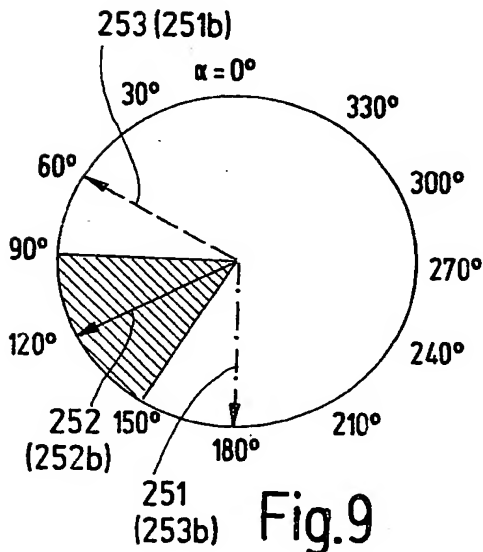


Fig.9

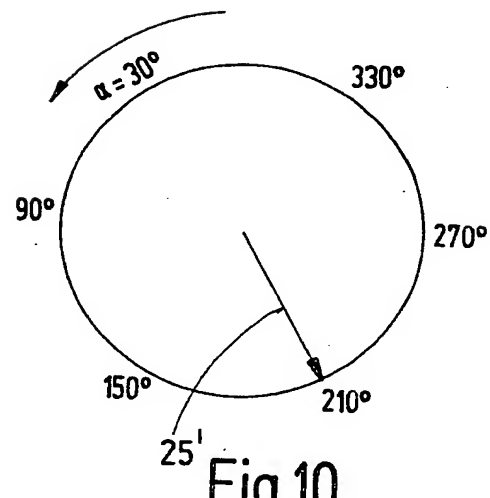


Fig.10